

18/IX-7

M-345

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P9-5268



И.М. Матора, Л.А. Меркулов, И.И. Шелонцев

О ФОРМИРОВАНИИ ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ
В ЛИНЕЙНОМ ИНДУКЦИОННОМ УСКОРИТЕЛЕ

ЛАБОРАТОРИЯ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ

1970

P9-5268

И.М. Матора, Л.А. Меркулов, И.И. Шелонцев

О ФОРМИРОВАНИИ ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ
В ЛИНЕЙНОМ ИНДУКЦИОННОМ УСКОРИТЕЛЕ

Направлено в "ЖТФ"

СОВЕТСКИЙ СОЮЗ
АКАДЕМИЯ НАУК

8464/2 кр

В в е д е н и е

Проблема ускорения электронов в линейном индукционном ускорителе (ЛИУ) без заметных потерь приобретает решающее значение, если ускоритель рассчитывается на энергию, превосходящую 10 Мэв.

Действующие известные ЛИУ в Ливерморе (США) ^{1/} и Дубне ^{2/} как по энергии электронов (меньше 10 Мэв), так и по средней мощности пучка еще находятся на уровне, когда потери ускоряемых электронов на уровне 20-30% не вызывают непреодолимых препятствий для их работы.

Новый разрабатываемый ныне ЛИУ-30^{3/} на энергию электронов 30 Мэв, ток в импульсе 250 а, длительность импульса 0,5 мксек и частоту повторения импульсов 50 гц будет иметь среднюю мощность в пучке 200 квт и, следовательно, здесь указанная выше проблема требует радикального решения.

В течение нескольких последних лет авторы занимались поисками причин, приводящих к потерям ускоряемых электронов в ЛИУ и поисками средств устранения этих потерь. Результаты этой работы изложены ниже.

Теория

Рассматривался ламинарный осесимметричный поток. Проведенный анализ показал, что, как правило, в условиях ЛИУ почти нет сил, которые вызывают неупорядоченные пересечения траекторий. Однако такие пересечения все же могут возникать при применении сложных электродов в электронной пушке (например, сеток) из-за наличия анодного отверстия, а также за счет упругого и неупругого рассеяния электронов частицами остаточного газа. Количественные оценки показали, что в условиях ЛИУ как ионизованные, так и нейтральные частицы остаточного газа не вызывают пересечения траекторий электронов в заметных количествах. Что касается часто применяемых в мощных пушках сеток, то для ЛИУ-30, где импульсный ток 250 а сравнительно невелик, их можно не применять. Неизбежным, однако, будет приводящее к некоторой неламинарности траекторий действие анодного отверстия.

Важной причиной возникновения неламинарности потока в ЛИУ может быть, кроме этого, появление в любой заданный момент времени в заданной точке потока разброса электронов по энергиям. Расчеты дают, что в этом случае поток немедленно становится неламинарным. Можно указать основные ситуации, сопровождаемые появлением разброса электронов по энергиям в заданное время в фиксированных точках потока. Во-первых, это может быть в случаях внезапной потери энергии электронами за счет их неупругого рассеяния в остаточном газе. Во-вторых, когда ускорение электрона начинается не с поверхности катода, а после ионизации одного из атомов остаточного газа, что наиболее часто может наблюдаться в примыкающем к катоду пространстве, где сечения ионизации максимальны. В-третьих, дисперсия по энергии может возникнуть в результате перемешивания электронов, инжектированных во время следования фронта токового импульса электронной пушки с электронами, инжектированными позднее, но при большей энергии.

Расчеты показывают, что из перечисленных трех ситуаций опасной является последняя.

Пользуясь описанной в [4] процедурой, можно показать, что параксиальные наружные траектории осесимметричного ламинарного пучка электронов в осесимметричных ускоряющем электрическом $\vec{E} (E_r, 0, E_z)$ и фокусирующем магнитном $\vec{H} (H_r, 0, H_z)$ полях описываются уравнением (1)

$$\psi'' + \frac{\psi}{4(\gamma^2 - 1)} \left[\frac{\gamma^2 + 2}{\gamma^2 - 1} \gamma'^2 + \left(\frac{eH_z}{E_0} \right)^2 \right] - \frac{2eI}{cE_0(\gamma^2 - 1)} \frac{1}{\psi} - \frac{M^2}{\psi^3} = 0 \quad (1)$$

где ось z цилиндрической системы координат направлена вдоль оси ускоряемого пучка,

$$\psi(z) = \sqrt{\beta} \gamma \cdot r(z) = \sqrt{\gamma^2 - 1} r(z),$$

$$\gamma = \frac{E}{E_0} = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad \beta = \frac{v}{c}, \quad |\vec{v}| = v_z = v,$$

I - полный ток ускоряемого пучка,

$$M = \frac{A}{m_0 c}, \quad A = m_0 \gamma_0 r_0^2 \dot{\phi}_0 - \frac{e}{c} \frac{r_0^2 H_0}{2},$$

r_0, H_0 - начальные значения наружного радиуса пучка и магнитного поля соответственно, штрих обозначает производную по z , система единиц Гауссова.

Все расчеты проводились на быстродействующих ЭВМ ОИЯИ с помощью численного интегрирования (1) методом Рунге-Кутты как с постоянным шагом, так и с переменным. Наружная траектория пучка прослеживалась вдоль всей длины ускорителя (≈ 150 метров) с шагом $h = 0,7$ см в случае счета с постоянным шагом и с заданной точностью в случае счета с переменным шагом.

При расчетах предполагалось, что единственным средством для удержания диаметра пучка в необходимых пределах является постоянное аксиальное магнитное поле.

Результаты

Из выполненного нами расчета параметров и их допусков, имеющих отношение к удержанию пучка во время следования рабочей части ускоряющего импульса, следует, что удержание для рабочей части импульса в предположении (это нужно подчеркнуть) ламинарности потока не вызывает затруднений. Удовлетворительные результаты с точки зрения проведения ускоряемого пучка на рабочей части ускоряющего импульса секций были получены со следующей оптической схемой ускорителя. Инжекция предполагалась при номинальной $\gamma_0 = 1,6$, $r_0 = 1,5$ см и $r'_0 = 0$. Затем электроны ускорялись в четырех секциях, каждая из которых имела длину 230 см и примерно однородное удерживающее магнитное поле, которое для $I_0 = 250$ а было ≈ 350 э. В разрывах между этими 4-мя секциями (по 25 см каждый) имелись короткие соленоиды, облегчавшие прохождение пучка. Последующие индукторные секции не имели внутри себя аксиального магнитного поля, и фокусировка пучка выполнялась короткими соленоидами, помещенными в разрывах (по 45 см каждый) между секциями. Длина секций №5,6 и 7 была по 140 см, а 8-й и 9-й по 210 см. Все остальные секции имели длину 280 см каждая. Промежутки между секциями, где линзы отсутствовали, составляли ≈ 15 см. Всего вдоль ускорителя устанавливалось 18 коротких соленоидов.

Следует отметить, что допустимо варьирование в широких пределах параметров этой схемы без заметного ухудшения прохождения пучка.

Найденное распределение аксиального магнитного поля и другие расчетные параметры, обеспечивающие отсутствие потерь в рабочей части импульса ускорителя, были взяты за исходные при расчетах ускорения электронов, следующих на фронте и спаде импульсов электронной пушки и вихревого поля индукторов. Длительность фронта и спада обоих этих импульсов принималась равной 0,15 мксек, а изменение напряжения во времени — линейное. Энергия вылетающих из пушки электронов на фронте и спаде определялась соответствующим мгновенным значением напряжения на катоде, а сила тока пушки определялась по закону Шоттки.

Расчеты были проделаны для обоих временных программ инжекции, применяемых в действующих ЛИУ. Особенности этих программ следующие (см. рис. 1). В ливерморском ЛИУ импульс электронной пушки по форме совпадает с ускоряющим импульсом индукторов, и фронт и спад импульса пушки во времени совпадают соответственно с фронтом и спадом импульса ускоряющего напряжения в индукторах. В дубненском же ускорителе длительность импульса пушки в несколько раз превосходит длительность ускоряющего импульса индукторов. Поэтому здесь ток инжекции практически постоянен на всем ускоряющем импульсе, включая его фронт и спад.

На рис. 2,3 приведены расчетные данные по прохождению ускоренных до 30 Мэв электронов, инжектированных по обеим временным программам. Видно, что потери электронов, ускоряемых в ламинарном потоке до больших энергий, велики в обоих случаях.

В связи с этим был рассчитан такой вариант ускорения, когда полный импульс тока пушки вместе с фронтом и спадом умещался на рабочей части (вершине) импульса ускоряющего напряжения индукторов, в надежде, что в этом случае потеря пучка во время ускорения не будет. Как видно из рис. 2,3, потери здесь резко сократились, однако, заметная часть электронов и в этом случае теряется.

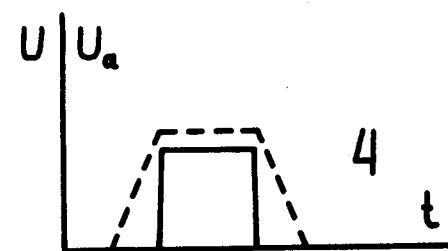
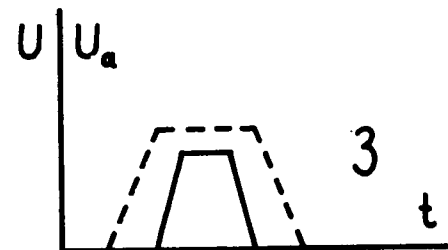
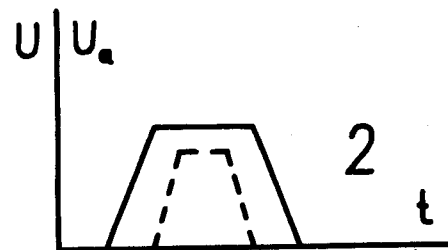
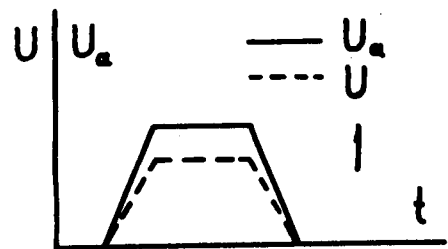


Рис. 1. Временные программы инъекции в ЛИУ. 1 - в Ливерморе (США), 2 - в Дубне, 3 - импульс пушки полностью расположен на рабочей части импульса индукторов, 4 - программа оптимальная, eU_a - энергия электронов на выходе из пушки, U - импульс напряжения ускоряющего поля.

В свете всех этих данных оптимальным решением задачи ликвидации потерь в ламинарном пучке ускоряемых в ЛИУ электронов представляется следующее. Из импульса тока пушки, имеющего по сравнению с импульсом ускоряющего напряжения в индукторах такую же длительность, на выходе из нее с помощью импульсного дефлектора устраняются способные потеряться электроны, следующие на фронте и спаде импульса пушки. Разумеется, маломощные отклоняющие импульсы дефлектора должны иметь достаточно короткие (~ нескольких наносекунд) фронт и спад, чтобы доля электронов, которые могут попасть в ускоритель с недопустимо возмущенным поперечным движением, была пренебрежимо малой. Эта схема инъекции электронов в ЛИУ свободна и еще от одного упоминавшегося выше недостатка. Здесь будет исключена возможность возникновения дисперсии по энергии за счет перемешивания электронов с отличающимися энергиями, инжектированными на фронте импульса пушки и на рабочей части напряжения, т.е. тем самым устраняется одна из причин, вызывающих неламинарность траекторий.

Выводы

Приведенные данные позволяют заключить, что если в ЛИУ удастся инжектировать ламинарный пучок электронов, то будет осуществимо его ускорение без потерь. Среди причин, вызывающих неламинарность потока в ЛИУ, существует только одна, не поддающаяся устранению. Это - действие отверстия в аноде электронной пушки. Нелинейность действия этого отверстия возникает по той причине, что столь большие, как это необходимо для ЛИУ, импульсные токи нельзя получить при малых площади катода и диаметре пучка, проходящего через анод. Однако, по видимому, можно надеяться с помощью существенного увеличения диаметра отверстия в аноде (и, следовательно, диаметра самого анода)

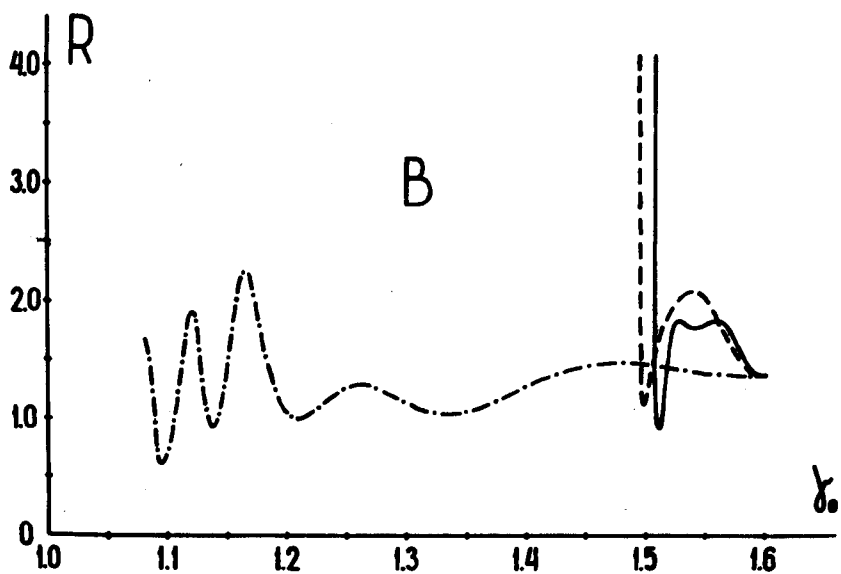
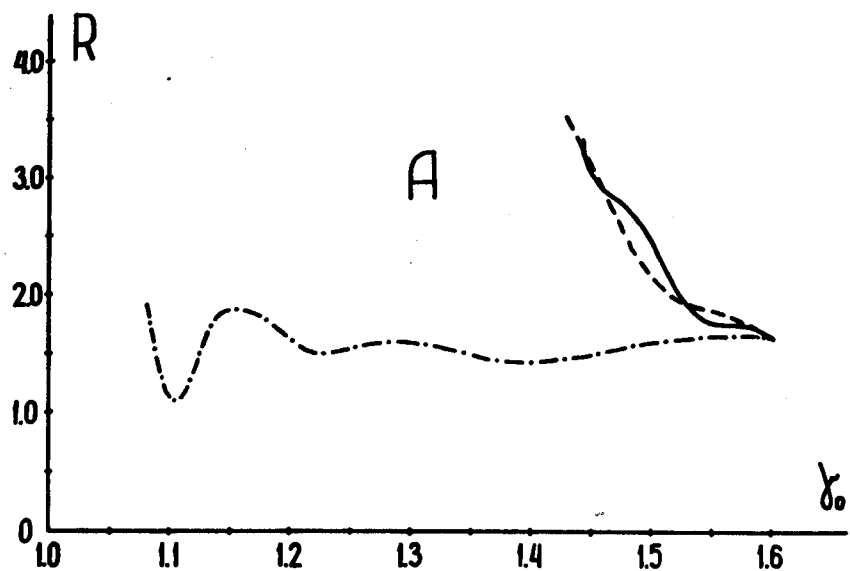


Рис.2. Радиус пучка при различных временных программах инжекции в см (максимально допустимый радиус - 2,2 см).

— программа №1 (рис. 1) А - энергия = 3 Мэв
 --- программа №2 (рис. 1) В - энергия = 6,5 Мэв.
 -.-.- программа №3 (рис. 1)

Здесь и в рис. 3 для программы №2 в единицах γ_0 условно выражена фаза инжекции на фронт и спад ускоряющего импульса.

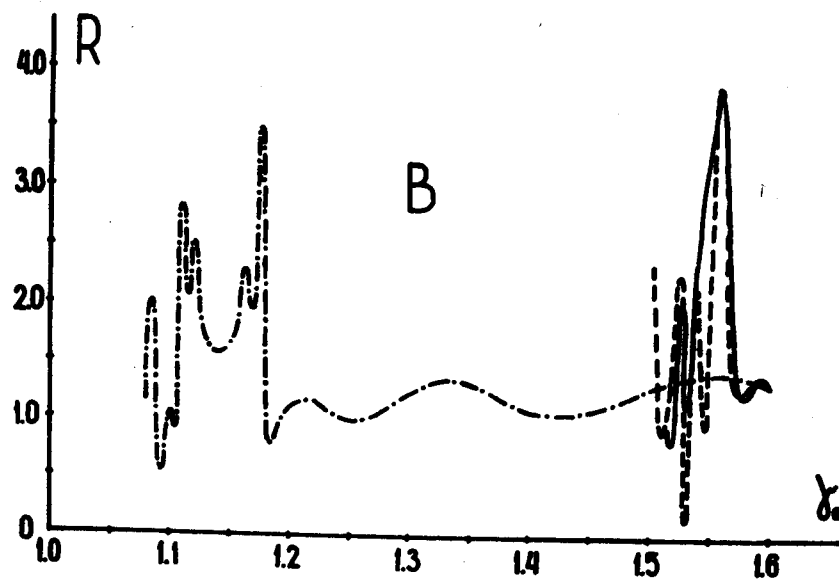
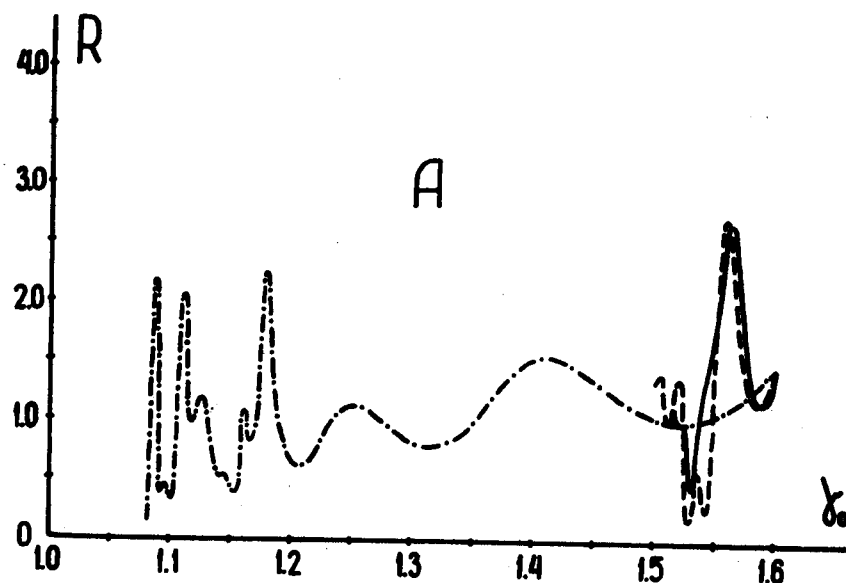


Рис. 3. Радиус пучка при различных временных программах инжекции в см.

— программа №1 (рис. 1) А - энергия = 15,5 Мэв
 --- программа №2 (рис. 1) В - энергия = 27 Мэв.
 -.-.- программа №3 (рис. 1)

при неизменном диаметре пучка уменьшить абберационное влияние анодного отверстия. Этот и ряд других вопросов, связанных с инжекцией электронов в ЛИУ, будут в дальнейшем нами исследоваться экспериментально.

В заключение авторы выражают искреннюю благодарность сотрудникам ЛНФ ОИЯИ Р.В. Харьюзову и П.С. Анцупову за ценные советы.

Л и т е р а т у р а

1. N.C. Christofilos, R.E. Hester, W.A.S. Lamb, D.D. Reagan, W.A. Sherwood, R.E. Wright.
Труды Международной конференции по ускорителям, 1073, Дубна, 1963, Атомиздат, М., 1964.
3. А.И. Анацкий, О.С. Богданов, П.В. Букаев, Ю.П. Вахрушин, И.Ф. Малышев, Г.А. Наливайко, А.И. Павлов, В.А. Суслов, Е.П. Хальчицкий.
А.Э. 21, 6, 439, 1966.
4. В.Д.Ананьев, Д.И. Блохинцев и др. Препринт ОИЯИ 13-4392, 1969.
В.Д.Ананьев, Д.И. Блохинцев и др. Препринт ОИЯИ 13-4395, 1969.
4. И.М. Матора. ЖТФ, XXXIX, в.1, 190, 1969.

Рукопись поступила в издательский отдел
20 июля 1970 года.